

## **Diseño optimizado y caracterización de hormigones autocompactantes reforzados con fibra polimérica de alto módulo**

**P. Carballosa de Miguel**

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja-CSIC de Madrid, España.

**A. Pacios Álvarez**

Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, España.

**J.P. Gutiérrez Jiménez**

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja-CSIC de Madrid, España.

### **RESUMEN**

Los hormigones autocompactantes suponen una alternativa de ejecución fácil y rápida, que garantiza una puesta en obra de calidad y una mejora de las prestaciones mecánicas a igualdad de contenido de cemento.

Por otro lado, los hormigones reforzados con fibra de carácter estructural son cada vez más demandados ya que, en el caso de contar con el tipo y proporción de fibra adecuado, permiten la sustitución total o parcial del armado convencional de acero.

Este estudio persigue el diseño optimizado de hormigones autocompactantes reforzados con fibra polimérica de alto módulo para la ejecución de obras de rehabilitación, como las llevadas a cabo en las bóvedas de la catedral de San Cristóbal de la Laguna, de tal manera que, manteniendo la característica de autocompactabilidad y sin perjuicio de la durabilidad, dicho hormigón presente un comportamiento post-fisuración que cumpla con las especificaciones del Anejo 14 de la EHE-08, en lo que se refiere a los valores mínimos de resistencia característica residual a tracción por flexión  $f_{R,1,k}$  y  $f_{R,3,k}$ , de tal forma que la fibra alcance la consideración de estructural, lo que supondría una alternativa técnica al refuerzo con fibra de acero que permitiría la sustitución parcial o total de la armadura de acero.

**PALABRAS CLAVE:** hormigón autocompactante, fibra polimérica, tenacidad, fibra estructural.

### **1.- INTRODUCCIÓN**

El hormigón autocompactante es un hormigón que, como consecuencia de una dosificación estudiada y del empleo de aditivos superplastificantes específicos, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de

## **Diseño optimizado y caract. de HAC con fibras poliméricas de alto módulo**

cualquier otro método de compactación, no presentando segregación, bloqueo de árido grueso, ni exudación de la lechada.

Los hormigones reforzados con fibras se definen como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. Estas fibras, fabricadas en un amplio rango de materiales (acero, vidrio, polímeros, carbono...), formas y características, son utilizadas ampliamente para prevenir y controlar la fisuración del hormigón, dotan al mismo de un mejor comportamiento (resistente y tenaz) frente a sollicitaciones distintas a la de compresión, consiguiendo aportar ductilidad una vez se ha producido el fallo de la matriz cementicia, puenteando las fisuras, transmitiendo la tensión a través de las fibras evitando el crecimiento de estas fisuras.

Las fibras pueden ser consideradas con función estructural cuando cumplan los requisitos recogidos en el Anejo 14 de la EHE-08 [1], contribuyendo en los cálculos relativos a alguno de los estados límites últimos o de servicio, y permitiendo su empleo la sustitución parcial o total de armadura en determinadas aplicaciones.

### **1.1.- Objetivo**

El objetivo del presente estudio se centra en determinar, basándonos en criterios de puesta en obra, resistencia y durabilidad, la dosificación óptima de un hormigón autocompactante fibrorreforzado con fibra sintética de forma que se pueda estudiar y evaluar la resistencia a la fisuración y el comportamiento post-fisuración aportado por fibra polimérica de alto módulo y el cumplimiento, o no, de la condición de fibra con función estructural, en los términos que recoge el Anejo 14 de la EHE-08, teniendo en cuenta que la base fundamental que se dispone en este Anejo 14 está basado en la experiencia con fibra de acero.

La fibra comúnmente más utilizada, con función estructural, es la fibra de acero. Sin embargo, en este estudio se utilizan fibras poliméricas de alto módulo que además de ofrecer las características habituales de este tipo de fibras como son el control de fisuración, mejora del comportamiento frente a la retracción y mejora del comportamiento frente al fuego, presentando una respuesta estructural eficiente que incrementa la tenacidad y/o capacidad de carga post-fisuración. Otras de las razones de la elección de este tipo de fibra se fundamentan en incrementar la vida útil de la estructura de hormigón por la total o mayor resistencia a la corrosión que presentan este tipo de fibras sintéticas de alto módulo frente a las de acero.

## **2.- PROCESO EXPERIMENTAL**

En este estudio, partiendo de resultados preliminares de diseño y ajuste práctico de dosificación, se definen tres mezclas de HAC reforzado con fibra de polipropileno de alto módulo de distinta naturaleza y proporción, sobre las que se evalúa el comportamiento reológico y analiza el comportamiento post-fisuración con el objeto de determinar, a partir del método de ensayo UNE EN 14651 *“Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)”* y las

recomendaciones del anejo 14 de la EHE-08, la condición, o no, de estructural de la fibra.

El objeto de esta fase es seleccionar 3 dosificaciones verosímiles de hormigón autocompactante fibrorreforzado, que cumplan con los parámetros reológicos de autocompactabilidad, y evaluar, en profundidad, el comportamiento mecánico, prestando especial atención al cumplimiento de los requisitos recogidos en el Anejo 14 de la EHE-08 en la consideración de la fibra con función estructural.

### 2.1.- Diseño y caracterización reológica de mezclas

Se definen tres dosificaciones de HAC fibrorreforzado, a partir de métodos de diseño sancionados por la práctica y pruebas preliminares de ajuste práctico de la proporción de los materiales componentes.

El porcentaje de fibra que se adiciona a los HAC está en torno al 0,8% en volumen, proporción de fibra que puede comprometer el comportamiento reológico del hormigón siendo, por tanto, indispensable la caracterización del estado fresco, conforme a los métodos de ensayos recogidos en normativa UNE, de los HAC diseñados.

**Tabla 1. Ensayos de caracterización del hormigón en estado fresco**

<i>Método de ensayo</i>	<i>Norma</i>
Ensayo del escurrimiento.	UNE EN 12350-8 [3]
Ensayo del embudo en V.	UNE EN 12350-9 [4]
Ensayo del escurrimiento con el anillo japonés.	UNE 83362 [5]
Determinación de la densidad	UNE EN 12350-6
Determinación del contenido de aire	UNE EN 12350-7

### 2.2.- Propiedades mecánicas

En esta fase se caracterizan las propiedades mecánicas de los HACFR, concretamente la resistencia a la compresión, el módulo elástico estático y la resistencia a la tracción por flexión siendo este último ensayo el que define la condición estructural de la fibra.

**Tabla 2. Ensayos de caracterización de las propiedades mecánicas**

<i>Método de ensayo</i>	<i>Norma</i>
Resistencia a compresión	UNE EN 12390-3 [8]
Módulo de elasticidad estático	UNE 83316 [9]
Resistencia residual a la tracción por flexión	UNE EN 14651 [2]

### 2.3.- Propiedades de durabilidad

La durabilidad de una estructura de hormigón es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural.

## Diseño optimizado y caract. de HAC con fibras poliméricas de alto módulo

Con objeto de verificar que la adición de fibras no perjudica la durabilidad de los HACFR diseñados, se realizan ensayos para evaluar la permeabilidad y absorción de agua por capilaridad.

**Tabla 3. Ensayos de caracterización de la durabilidad**

<i>Método de ensayo</i>	<i>Norma</i>
Profundidad de penetración de agua bajo presión.	UNE-EN 12390-8 [10]
Determinación de la absorción de agua por capilaridad	UNE 83982 [11]

### 3.- RESULTADOS

#### 3.1.- Diseño y caracterización reológica de mezclas

El diseño de las mezclas de hormigón objeto de estudio se realiza según las recomendaciones recogidas en el Anejo 17 de la EHE-08 [1], aunque varias de ellas son modificadas con objeto de satisfacer las exigencias de autocompactabilidad la cual se ve comprometida por la adición de la fibra.

En un intento de mejorar la distribución de fibras, se estudió la secuencia de amasado, aumentando además el tiempo de este ya que el aumento del tiempo de amasado activa las partículas de policarboxilato, mejorando su orientación y reduciendo la pérdida de trabajabilidad [6,7]. Tanto las proporciones como los resultados de los ensayos se especifican en las tablas que siguen:

**Tabla 4. Dosificaciones realizadas de HACFR**

<i>Materiales componentes</i>	<i>HACRF-1 (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>HACRF-2 (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>HACRF-3 (kg/m<sup>3</sup>)</i>
Agua	190	211	211
Cemento 42,5 R	400	380	380
Grava 4/10	419	553	553
Arena 0/4	1088	590	590
Arena 0/3	-	280	280
Filler	250	300	300
Aditivo tipo 1	12,5	9,6	9,6
Aditivo tipo 2	-	1,4	1,4
Fibra tipo 1	7	6	-
Fibra tipo 2	-	-	7
Volumen de pasta (%)	43	46	46
Relación A/C	0,48	0,56	0,56
Relación A/finos	0,29	0,31	0,31

**Tabla 5. Características técnicas de la fibra**

<i>Tipo de fibra</i>	<i>Material</i>	<i>Longitud de la fibra (mm)</i>	<i>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Resistencia a Tracción (MPa)</i>	<i>Elongación (%)</i>
Fibra tipo 1	Polipropileno	50	0,90	275	24,4
Fibra tipo 2	Polipropileno	44	0,91	400	7

**Tabla 6. Resultados de ensayos en fresco**

<i>Norma de ensayo</i>	<i>Parámetro de medida/Unidades</i>	<i>HACRF-1</i>	<i>HACRF-2</i>	<i>HACRF-3</i>
UNE EN 12350-8	Escurrimiento (df) (mm)	750	755	835
UNE EN 12350-9	Tiempo (s)	12	4	5
UNE 83362	Coefficiente de bloqueo (C <sub>bl</sub> )	*	*	0,88
UNE EN 12350-6	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,42	2,38	2,40
UNE EN 12350-7	Contenido de aire (%)	1	1,4	1,3

*\*No se muestran los resultados, ya que la fibra bloqueaba el paso del hormigón a través del anillo japonés*



**Figura 1. Bloqueo de la masa de hormigón en el anillo J**

### 3.2.- Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas están definidas en primer lugar por la resistencia a compresión, que se determina sobre 3 probetas cilíndricas, por dosificación, de dimensiones 150 x 300 mm, siendo la dosificación HACFR-1, de mayor proporción de

### Diseño optimizado y caract. de HAC con fibras poliméricas de alto módulo

cemento ( $400 \text{ kg/m}^3$ ) y menor relación agua/cemento (0,47 frente a 0,55 de las dosificaciones), la que alcanza mayor valor de resistencia a compresión.

Por otro lado, al determinar el valor de la resistencia a flexotracción a partir de los resultados del ensayo UNE EN 14651, se comprueba como de nuevo la dosificación HACFR-1 registra el mayor valor de resistencia mientras que las dosificaciones HACRF-2 y HACRF-3 presentan una resistencia a flexotracción muy similar, aún cuando la proporción de fibra de la dosificación HACFR-2 es inferior a la del HACFR-3 lo que pone de manifiesto la influencia del tipo de fibra.

**Tabla 7. Resultados de propiedades mecánicas**

<i>Método de ensayo</i>	<i>Parámetro de medida/Unidades</i>	<i>HACRF-1</i>	<i>HACRF-2</i>	<i>HACRF-3</i>
UNE EN 12390-3	Resistencia (MPa)	52,7	46,8	44,4
UNE 83316	Módulo elástico (GPa)	28,7	29,7	30,5
UNE EN 14651	Resistencia (MPa)	5,9	5,2	5

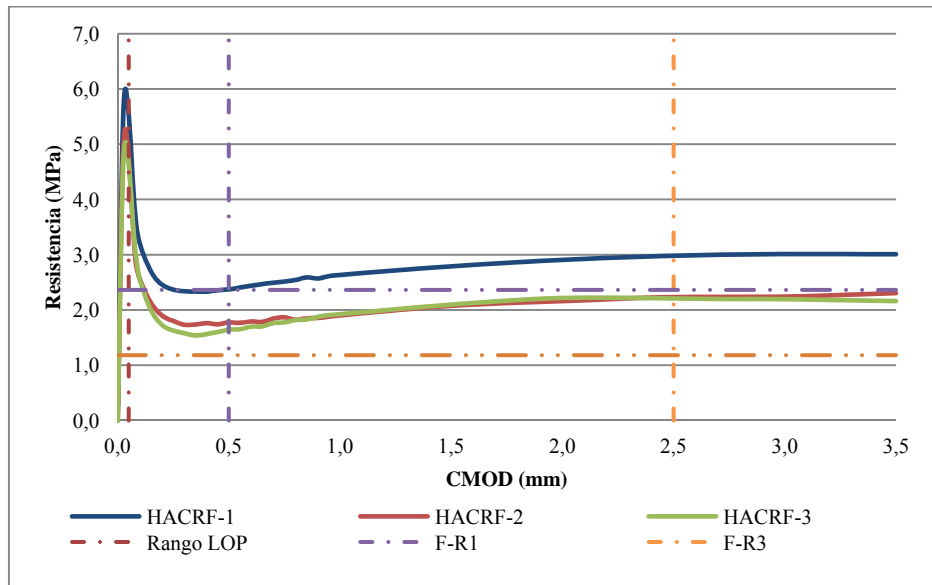
La resistencia residual a flexión por tracción se determina en control por deformación sobre 3 probetas prismáticas, por dosificación, de dimensiones  $600 \times 150 \times 150 \text{ mm}$  entalladas en su parte central. Todas las probetas ensayadas manifiestan capacidad portante una vez se fisura la matriz de hormigón, demostrándose la capacidad portante de este tipo de fibras poliméricas de alto módulo.



**Figura 2. Disposición ensayo UNE EN 14651**

El Anejo 14 de la EHE-08 establece que para la consideración de la fibra con condición estructural la resistencia característica residual a tracción por flexión  $f_{R,1,k}$  no será inferior al 40% del límite de proporcionalidad y  $f_{R,3,k}$  no será inferior al 20% del límite de proporcionalidad. Atendiendo a lo expuesto, sólo la dosificación HACFR-1 cumple las condiciones para la consideración de la fibra como estructural pudiendo entonces considerarse su contribución en el cálculo relativo de alguno de los estados límite últimos o de servicio.

Las dosificaciones HACFR-2 y HACFR-3 presentan una carga de rotura, un límite de proporcionalidad (LOP) y un comportamiento post-fisuración muy similar, a pesar de contar con distinto tipo y proporción de fibra, pero insuficiente para la consideración de la fibra con carácter estructural, al no cumplir el requisito de  $f_{R,1,k}$  a la apertura de fisura 0,5 mm ya que la carga cae más de un 40% del LOP, siendo este el requisito más restrictivo a la hora de considerar la fibra polimérica de alto módulo como estructural.



**Figura 3. Comparativa de las curvas resultantes del ensayo UNE EN 14651**

En cuanto a la distribución de fibras, ésta es muy homogénea en toda la superficie de rotura de la probeta.



**Figura 4. Distribución de fibras en superficie de rotura**

### 3.3.- Durabilidad

La forma más adecuada de reducir los ataques químicos y físicos que degradan el hormigón es a través de la consecución de hormigones poco permeables exteriormente y con una red capilar poco comunicada. Con esta premisa, se evalúan en este apartado la permeabilidad y la absorción de agua por capilaridad de los hormigones diseñados tomando como referencia especificaciones recogidas en la Instrucción EHE-08 y en el código CEB-FIB.

**Tabla 8. Requisitos EHE-08 sobre la profundidad de penetración de agua**

<i>Clase de exposición ambiental</i>	<i>Especificación para la profundidad máxima</i>	<i>Especificación para la profundidad media</i>
IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H, F, Qb (en el caso de elementos en masa o armados)	50 mm	30 mm
IIIc, Qc, Qb (solo en el caso de elementos pretensados)	30 mm	20 mm

**Tabla 9. Clasificación CEB-FIB de la calidad de un hormigón en función de su coeficiente de absorción capilar o *Sorptivity***

<i>Calidad del hormigón</i>	<i>Sorptivity - S - (mm/min<sup>0,5</sup>)</i>
Bueno	$S < 0,1$
Normal	$0,1 \leq S < 0,2$
Pobre	$S \geq 0,2$

**Tabla 10. Resultados de los ensayos de durabilidad**

<i>Norma de ensayo</i>	<i>Parámetro de medida/Unidades</i>	<i>HACRF-1</i>	<i>HACRF-2</i>	<i>HACRF-3</i>
UNE-EN 12390-8	Frente de penetración (mm)	0,0	0,0	0,0
UNE 83982	Coefficiente de absorción capilar (kg/m <sup>2</sup> min <sup>0,5</sup> )	0,09	0,07	0,07





**Figura 5. Disposición ensayo UNE 83982**

La penetración de agua bajo presión, en las tres dosificaciones realizadas, no dio ningún resultado cuantitativo (no se observa frente de penetración de agua tras la rotura a brasileño y posterior aplicación del azul de metileno) lo que pone de manifiesto la baja permeabilidad superficial del material, además el coeficiente de absorción de agua por capilaridad determinado permite clasificar los hormigones como de calidad buena.

#### **4.- CONCLUSIONES**

En el estado fresco, la adición de fibras, en cualquiera de las naturalezas y proporciones estudiadas, no impide la obtención de un hormigón autocompactante que cumpla con los parámetros de autocompactabilidad fijados por la EHE-08.

En el estado endurecido, concretamente en lo que se refiere a los valores relativos a la resistencia a compresión, módulo de elasticidad y resistencia a flexotracción, la adición de fibras, en cualquiera de las proporciones y soluciones estudiadas, no supone la detección de ningún comportamiento anómalo.

Es posible cumplir, con fibras poliméricas de alto módulo y en el caso de la dosificación HACFR-1, los requisitos que fija el Anejo 14 para que la fibra pueda considerarse como de fibra estructural, pudiendo entonces considerarse su contribución en el cálculo relativo de alguno de los estados límite últimos o de servicio la sustitución total o parcial de la armadura pasiva.

Desde el punto de vista de la durabilidad, la adición de fibras no perjudica las condiciones de permeabilidad y absorción capilar, obteniéndose así hormigones fibrorreforzados de buena calidad y alta compacidad que dificultan la propagación de agentes químicos que pudieran perjudicar la durabilidad del hormigón diseñado.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo se ha desarrollado dentro del proyecto Intramural 201060E118 “Investigación de hormigones especiales avanzados para aplicaciones estructurales en ingeniería y arquitectura” financiado por el Consejo Superior de Investigaciones

Científicas, en colaboración con el proyecto del Plan Nacional BIA2007-62464 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

## **REFERENCIAS**

- [1] MINISTERIO DE FOMENTO. - EHE-08, Instrucción de Hormigón Estructural. Real Decreto 1247/2008, 3ª edición, 2009. 720 p.
- [2] AENOR. - Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual). UNE EN 14651. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid.
- [3] AENOR. - Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento. UNE EN 12350-8. Asociación Española de Normalización y Certificación Madrid.
- [4] AENOR. - Ensayos de hormigón fresco. Parte 9: Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V. UNE EN 12350-9. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid.
- [5] AENOR. - Ensayos Hormigón autocompactante. Ensayo con el anillo japonés. UNE 83362. España: Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid
- [6] BEZERRA E.M.; JOAQUIM A.P.; SAVASTANO Jr. H., JOHN V.M. y AGOPYAN V. - The effect of different mineral additions and synthetic fibre contents on properties of cement based composites”, Cement Concrete Composite 28 (6), 2006, pp 555–563.
- [7] FERNÁNDEZ-ALTABLE V. y CASANOVA I., - Influence of mixing sequence and superplasticiser dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures, Cement Concrete Reseach 36 (7), 2006, pp 1222–1230.
- [8] AENOR. - Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE EN 12390-3. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid.
- [9] AENOR. - Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión. UNE 83316. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid.
- [10] AENOR. - Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión. UNE EN 12390-8. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid.
- [11] AENOR. - Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund. UNE 83982. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid.